

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

ISSN 1409-2441

Vol. 17 (1)

Ene/Jul 2007

CONTENIDO

Artículos

1. Dimensionamiento y costeo de una planta de lavado de vehículos recolectores de desechos sólidos para los principales cantones del Área Metropolitana de Costa Rica 17-26
Ruiz, Francisco.
2. Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica..... 27-41
Schmidt, Víctor; Quirós, Christopher.
3. Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes 43-59
Rodríguez, Wilson; Muñoz, Edgar; Núñez, Federico.
4. Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías encerradas 61-76
Rodríguez, Jorge; Ruiz, Daniel; Coral, Álvaro; Pereira, Mauricio.
5. Pasta hidrotérmica y termoquímica a la soda obtenida a partir de residuos de paste (*Luffa cylindrica Roem*) 77-84
Blanco, María Lorena.
6. Diseño y construcción de un equipo de pruebas para la determinación de la resistencia al flujo de aire en granos y semillas..... 85-96
Aguilar, José Francisco.

Notas técnicas

1. Prototipo didáctico para la enseñanza de la Ingeniería Estructural 99-111
Muñoz, Edgar; Núñez, Federico; Otalora, Camilo.
2. Análisis de los factores que intervienen sobre la resistencia al flujo de aire en granos y semillas en operaciones de manejo poscosecha 113-124
Aguilar, José Francisco.

Trabajos de Graduación

Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2006 de la Facultad de Ingeniería..... 127-140

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería 143-150

EDITORIAL
UCR

EDITORIAL
UCR

Número (1)

Enero / Julio 2007

Volumen 17

REVISTA INGENIERÍA

<http://www.revistaingenieria.inii.ucr.ac.cr>
www.ucr.ac.cr / ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO/JULIO 2007 - VOLUMEN 17 - Número (1)



Notas técnicas

PROTOTIPO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

*Edgar Muñoz Díaz
Federico Núñez Moreno
Camilo Otalora Sanchez*

Resumen

El grupo de investigación denominado *Estructuras*, viene trabajando, desde hace tres años en el tema de evaluación de puentes existentes, mediante técnicas de confiabilidad estructural, apoyada en instrumentación. Dentro de este proyecto se desarrolló un prototipo consistente en un modelo a escala (1:20) del puente en acero Puerto Salgar, cuya obra de infraestructura vial es una de las más importante de Colombia.

Por medio del sistema electrónico, se miden las deformaciones unitarias y las fuerzas internas en tiempo real, de cinco de los elementos principales del prototipo, cuando es sometido a las cargas dinámicas. Esto lo hace a través de un sistema electrónico empleando la señal de galgas extensométricas (strain gages), la cual es amplificada, filtrada y digitalizada usando un microcontrolador. Para visualizar las fuerzas internas sobre los elementos monitoreados, se diseñó un programa en la plataforma LabView® 7.1 y en Visual Basic® para Excel®. Este prototipo es una herramienta didáctica, con gran impacto académico, utilizada para dictar la mayoría de materias del área de estructuras de la carrera de Ingeniería Civil, especialmente las de laboratorio de estructuras, estructuras metálicas y puentes. Además, esta herramienta sirve para involucrar a los estudiantes de ingeniería civil en las líneas de investigación del área de estructuras, a través de diferentes trabajos de grado. También, para profundizar en las metodologías de análisis y los procesos constructivos, de una de las obras de ingeniería civil más importantes de Colombia, ejecutada por ingenieros alemanes hace más de cincuenta años

Palabras clave: ingeniería de puentes, herramienta didáctica, prototipo, confiabilidad estructural.

Abstract

Research group Estructuras, has been working since year 2002 in the evaluation of existing bridges using structural reliability techniques supported by instrumentation. As part of this project a fully 1:20 scaled model of the Puerto Salgar Bridge was developed. This Bridge is one of the most important in Colombia. The prototype measures, in real time, inner forces and unitary strains out of five of the main members when the model is affected by dynamic loads. This is done by means of an electrical system that amplifies, filters and digitalizes the signal coming from the strain gages. To visualise inner forces of the monitored members a Lab View7.1® and Visual Basic® programs were developed. This prototype is a didactic tool, with great academic impact, used to dictate most of matters of the area of structures of the race of Civil Engineering, specially those of laboratory of structures, metallic structures and bridges. In addition this tool serves to involve to the students of civil engineering in the lines of investigation of the area of structures, through different works from degree. Also to deepen in the methodologies of analysis and the constructive processes, one of more important civil engineer installations of our Country, executed by engineers German for more than 50 years

Keywords: bridge engineering, didactical tools, prototype, structural reliability.

Recibido: 04 de mayo del 2006 • **Aprobado:** 05 de octubre del 2006

1. INTRODUCCIÓN

Los profesores e investigadores tenemos la tarea de desarrollar e implementar nuevas técnicas didácticas y docentes para la enseñanza de la

Ingeniería (Ruiz, D., Uribe, E. J. & Phillips, C. 2005), que logren una adecuada motivación, teniendo en cuenta los cambios que están ocurriendo en el mundo, tales como: avances tecnológicos, globalización, etc. La educación

para el nuevo siglo no debe centrarse únicamente en la transmisión del conocimiento, sino también, en proporcionar herramientas para que los estudiantes construyan su propio aprendizaje (Ruiz, D., Uribe, E. J. & Phillips, C. 2005). El grupo de investigación *Estructuras*, del Departamento de Ingeniería Civil, viene trabajando en la evaluación de estructuras existentes mediante técnicas de confiabilidad estructural, apoyado en su instrumentación y monitoreo (Muñoz, E. E., Ruiz, D., Prieto J. A. & Ramos, A. 2006; Rodríguez, W., Muñoz, E. & Nuñez, F. 2007; Muñoz et al., 2005; Muñoz E. E., Prieto, J. A. & Obregón, 2004; Muñoz, E. E., Daza, R. D., & Obregón, N. 2002; Muñoz, 2001). Dentro de estos proyectos de investigación, se decidió involucrar a los estudiantes de Ingeniería Civil, con el objeto de motivarlos en su proceso de formación académica. Para esto, se desarrolló un prototipo didáctico a escala del puente Puerto Salgar como se muestra en la Figura 2, al cual se le realizó el año pasado un análisis de confiabilidad estructural apoyado en su instrumentación. Este prototipo sirvió, inicialmente, para la organización

y planeación de la instrumentación del puente real. También para probar y calibrar el sistema electrónico que se diseñó para la correspondiente instrumentación.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1, se presentan las diferentes etapas llevadas a cabo para la construcción e implementación del prototipo, el cual tiene aplicaciones didácticas para la enseñanza de aspectos básicos de la Ingeniería Estructural.

2.1 Recopilación de información e inspección del puente

Para diseñar e implementar el modelo a escala del puente, se realizó una inspección visual y un registro fotográfico de la estructura real. En esta visita se estudió su sistema estático, tipo de acero, tipo de elementos, características de las uniones, tipos de apoyos y demás aspectos

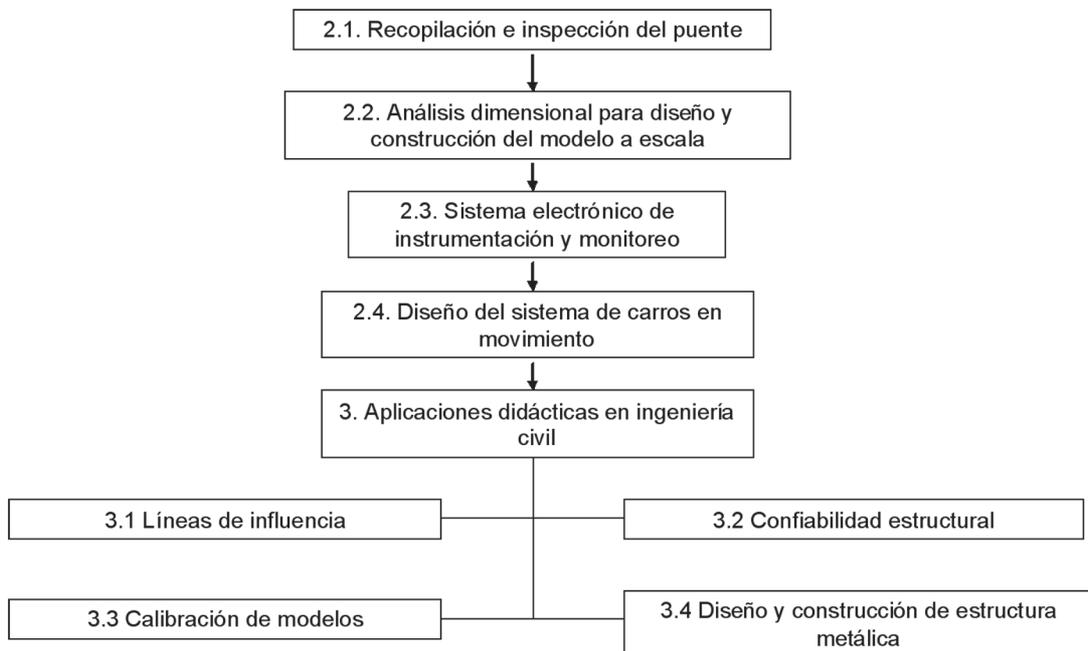


Figura 1. Flujograma para la construcción y puesta en marcha del prototipo didáctico.
Fuente: (Los autores).

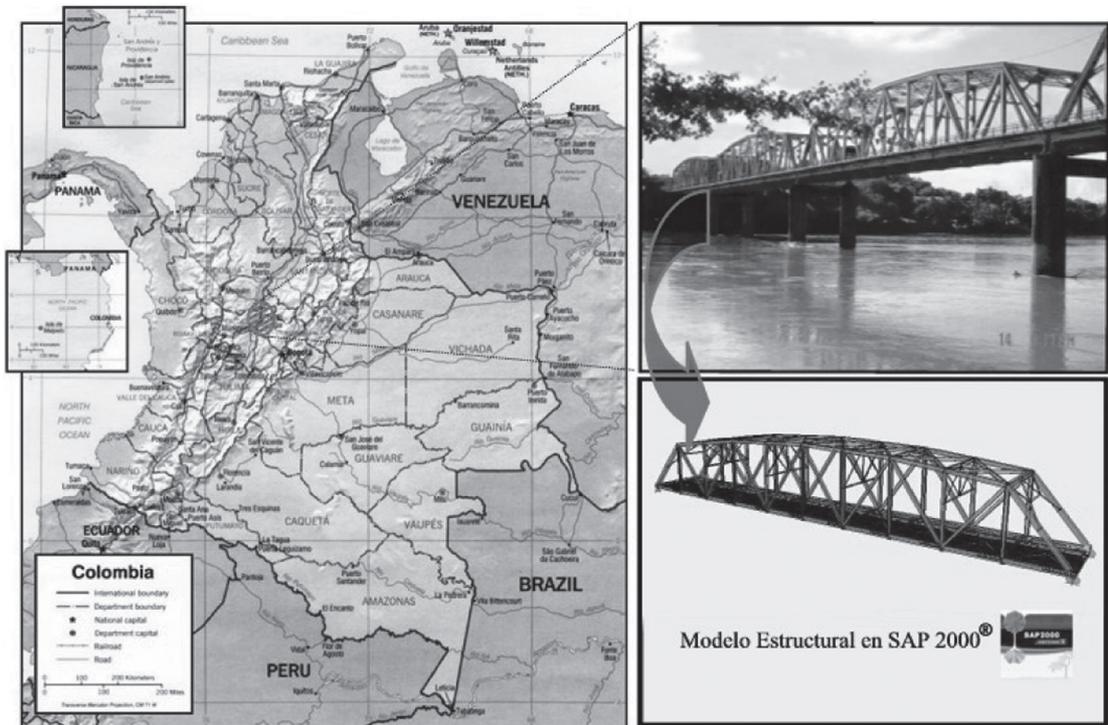


Figura 2. Localización geográfica y fotografía en perfil del Puente Salgar.

Fuente: (Instituto Nacional de Vías).



Figura 3. Ensayo mecánico de muestra de lámina delgada, de acuerdo con NTC-3353.

Fuente: (Los autores).

con base en el levantamiento geométrico, realizado por el grupo de *Estructuras* dentro uno de los proyectos de investigación. El puente es vehicular y ferroviario, construido en los años cincuentas por una firma alemana de ingeniería. Es una estructura mixta (acero y concreto), conformada por cuatro naves iguales simplemente apoyadas (Figura 2). Además posee una rampa de estructura mixta (vigas en acero y losa en concreto) de acceso curva. El prototipo que se diseñó, corresponde solamente a una de las naves típicas.

2.2 Análisis dimensional para diseño y construcción de modelo a escala

estructurales. Con la ayuda de ingenieros del Instituto Nacional de Vías y de algunas empresas consultadas, se estudiaron los planos de diseño y de rehabilitación, los cuales se complementaron

Basados en la información recopilada y en los planos existentes, se elaboraron planos del modelo a escala (1:20) del puente Puerto Salgar. Para su construcción, se emplearon láminas de acero galvanizado con un módulo de elasticidad (E) de

Cuadro 1. Resultados mecánicos de tres probetas.

Geometría	Probetas		
	1	2	3
Ancho (mm)	12,7	12,1	12,5
Espesor (mm)	1	1	1
Longitud calibrada inicial (mm)	50	50	50
Área inicial (mm ²)	12,7	12,1	12,5
Ensayo a tensión			
Elongación	63,4	60,2	64,1
Fuerza máxima (N)	4160	3890	4100
Fuerza de rotura (N)	2496	2334	2460
Fuerza en el límite de fluencia (N)	3192	3190	3250
Esfuerzo máximo a tracción (MPa)	327,6	321,5	328
Esfuerzo de rotura (MPa)	196,5	192,9	196,8
Esfuerzo en el límite fluencia (MPa)	251,3	263,6	260,0

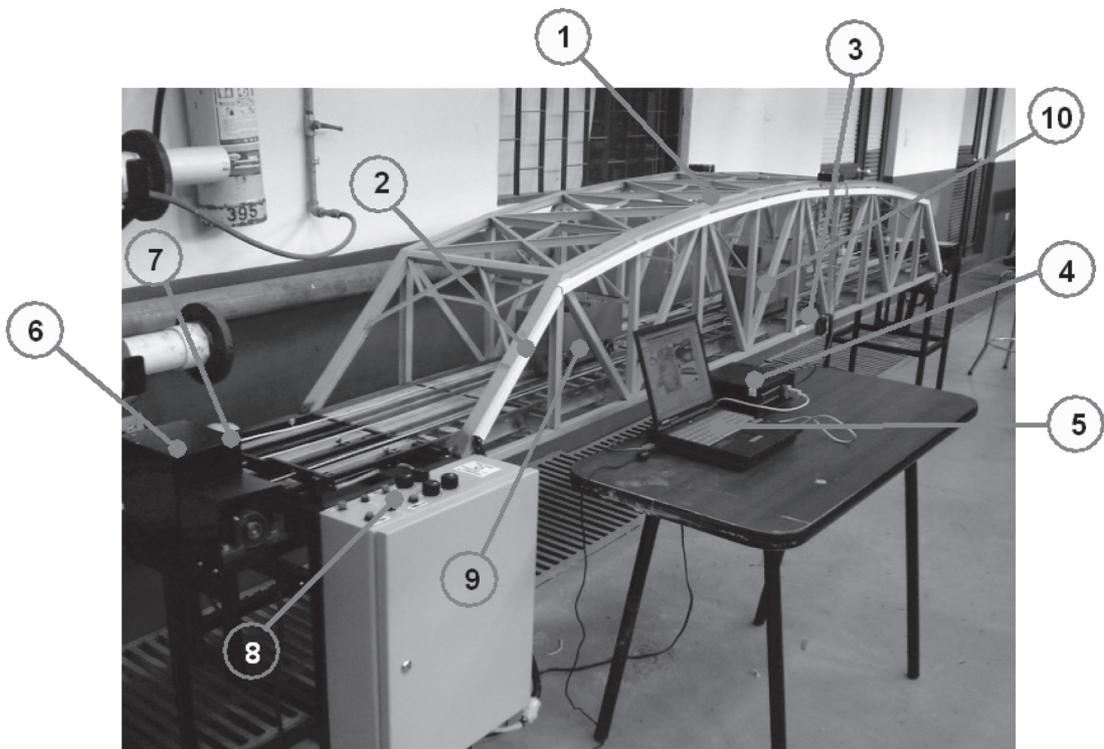


Figura 4. Componentes del prototipo didáctico.
Fuente: (Los autores).

204 000 MPa y cuenta con los estándares de calidad NTC 4011 y ASTM 653 y 924. Se realizaron tres ensayos mecánicos a probetas de acero (Figura 3), de acuerdo con la norma NTC 3353, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 1.

El prototipo, consiste en dos armaduras de paso superior y un tablero compuesto por vigas longitudinales y transversales, apoyadas sobre los nudos de las cerchas (Figura 4, componente 1). El modelo consta de tres calzadas, dos para cargas vehiculares y una para el paso del tren. En las Figuras 4 y 5 se presentan los componentes del prototipo.



Figura 5. Lista de componentes del prototipo.
 Fuente: (Los autores).

2.3 Sistema electrónico de instrumentación y monitoreo

Para este proyecto se contó con el asesoramiento del Departamento de Ingeniería Electrónica, de la Pontificia Universidad Javeriana, el cual realizó el diseño del sistema electrónico y ayudó en su correspondiente implementación en laboratorio y campo. El objetivo del sistema electrónico, es medir deformaciones unitarias y fuerzas de los elementos principales del puente, cuando es sometido a carga durante su operación normal y almacenar dichos

datos en tiempo real en un computador. Para el cálculo de este valor se tiene en cuenta la configuración física de la instalación de las galgas extensométricas, las que constan de dos sensores instalados a 90° (Figuras 6 y 5), con uno de ellos alineado con el eje de la carga (ϵ) y el otro perpendicular a éste ($-v \epsilon$). Para llevar a un punto común la información de la deformación medida en cada uno de los puntos, se optó por un esquema de medidores instalados sobre una red de datos multipunto master-slave (rs4-85). En cada punto de medida, se tomó la señal de las galgas extensométricas (Figura 4) y fue amplificada, filtrada y digitalizada usando un microcontrolador. Cada módulo de adquisición tiene una dirección de red asociada, de tal forma, que puede ser interrogado por una unidad que actúa como árbitro de la red, solicitando la información a cada uno de los medidores. La unidad que concentra los datos conforma una trama con la información de todos los puntos y la envía en formato ASCII, por medio de un puerto serial RS-232 a un computador para que almacene la información. Se decidió usar este esquema, para no depender de un programa especializado en el computador y poder almacenar los datos usando un programa genérico de manejo del puerto serial, que está incorporado en todos los sistemas operativos y no se constituye en un costo adicional. El voltaje de salida para esta configuración es:

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F\epsilon(1 + \nu) \times 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon(1 - \nu) \times 10^{-6}} mV/V \tag{1}$$

En donde ν es el coeficiente de Poisson del material, ϵ la deformación unitaria y F el factor del de los strain gage adquiridos (2,11 dado por el fabricante). El voltaje diferencial E_0 es amplificado por 800 y digitalizado en 10 bits (1024 niveles) con un voltaje de referencia de 5000 V. Con estos datos se obtiene que por unidad de medida se tenga una constante de $1,77 \mu\epsilon$.

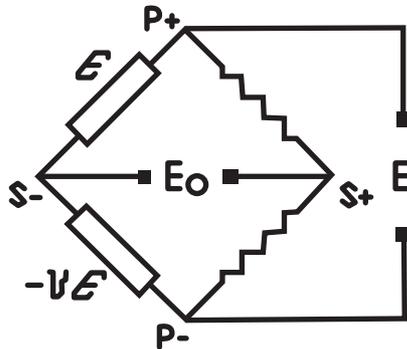


Figura 6. Circuito electrónico.
Fuente: (Los autores).

2.4 Diseño de sistema de carros en movimiento

Para el prototipo se implementó un sistema electrónico compuesto por tres cargas dinámicas con peso variable, impulsadas por dos motores con velocidad variable (Ver componentes 6, 7, 8, 9 y 10 en las Figuras 4 y 5). El sistema permite aplicar cargas dinámicas variables en el modelo a escala, producidos por solamente los carros o el tren. También permite producir en estos el efecto simultáneo de los carros y el tren (cada uno con diferente velocidad). Los carros y el tren cargados con plomo tienen una carga máxima de 293,4 kg y 32,1 kg, respectivamente. A cada uno de estos componentes se les puede variar su peso, de acuerdo con cuatro niveles predeterminados.

2.5 Sistema de adquisición y análisis de datos contra el tiempo

Las galgas extensométricas y su amplificador están conectados a un concentrador y posteriormente a un computador, el cual permite mostrar y grabar la lista de datos de los voltajes de cada uno de los cinco elementos monitoreados (cambiantes a tiempo real), por los efectos dinámicos generados por los carros en movimiento. La viabilidad de estos datos

con respecto al tiempo se puede observar en el LabView® 7.1, con lo cual se puede deducir la tendencia de los efectos sobre cada uno de los elementos. La evaluación de la señal y el correspondiente análisis se hace a través de un programa desarrollado en Visual Basic® para EXCEL® y que permite investigar la variabilidad y confiabilidad de los cinco elementos instrumentados.

3. APLICACIONES DIDÁCTICAS EN INGENIERÍA CIVIL

Con el prototipo didáctico se pueden hacer diversos ejercicios académicos de análisis y deducción para todas las asignaturas del área de estructuras de la carrera de Ingeniería Civil. Es una herramienta didáctica, útil para futuros proyectos de investigación y trabajos de grado de la carrera de Ingeniería Civil. A continuación se presentan algunas de sus aplicaciones y usos.

3.1 Líneas de influencia

El método de las líneas de influencia es básico dentro de la Ingeniería Civil, con amplia aplicación para el análisis de estructuras con cargas en movimiento. Este tema se puede explicar y exponer claramente a través del prototipo didáctico, con un enfoque de carácter experimental y analítico. Para demostrar su aplicación, se realizó un ensayo simple que consiste en averiguar la variabilidad (máxima, mínima, media, etc) de las fuerzas internas sobre uno de los elementos con sistema de monitoreo (cordón inferior armadura aguas arriba), cuando la estructura queda sometida a cargas dinámicas producidas por los carros con el mayor peso y la máxima velocidad. Así mismo, al observar los efectos sobre este elemento, con los mismas condiciones anteriores, pero agregando el efecto del tren con peso máximo. Los resultados de este ejercicio se presentan en la Figura 7, los cuales fueron obtenidos a través del sistema de control de carros y el electrónico de monitoreo.

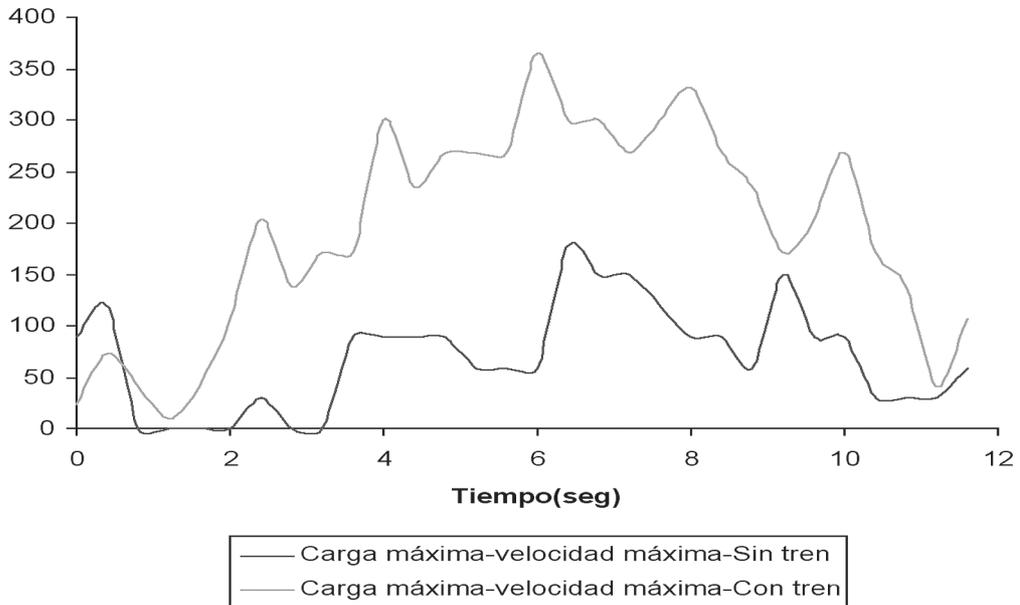


Figura 7. Línea de influencia del cordón superior aguas arriba para dos hipótesis de carga.
Fuente: (Los autores).

Se encontró la tendencia de las fuerzas internas sobre el elemento, siendo mayor cuando las cargas pasan por el centro del modelo estructural. Además, un aumento del 25% promedio de las fuerzas internas sobre el elemento cuando la hipótesis de carga es simultánea. Se demostró con este ejercicio, las ventajas de las líneas de influencia para evaluar los efectos de las cargas móviles sobre los puentes, procedimiento necesario en la ingeniería para el diseño y/o revisión de los puentes reales.

3.2 Confiabilidad estructural

Los valores nominales de factores de seguridad y demás coeficientes estipulados en los códigos, son calculados, en su mayoría, mediante técnicas de confiabilidad estructural y su objetivo es mantener la estructura en un rango de funcionamiento alejado de la falla o con una probabilidad de falla tendiente a cero. Dado que las probabilidades de falla son muy pequeñas (del orden de 10^{-5}) y para facilitar el análisis de los valores hallados, en los códigos se maneja el índice de confiabilidad (β),

definidos como la inversa de la función normal estándar acumulativa de la probabilidad de falla (P_f):

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \tag{2}$$

Para tal efecto se utilizarán las técnicas de confiabilidad, las cuales consisten en verificar la probabilidad entre las curvas de la resistencia (R) y de la sollicitación (S). Cuando la función G es negativa, la estructura se encuentra en condición de falla, cuando es mayor que cero, la seguridad de la estructura es aceptable y cuando es igual a cero, la estructura se encuentra en condición crítica. Al término G se le conoce como margen de seguridad. Debido a la gran cantidad de variables que intervienen tanto en el cálculo de la resistencia como en el cálculo de la sollicitación, estas son tomadas como variables aleatorias con su correspondiente distribución de probabilidad. Para el caso de las variables aleatorias distribuidas R y S , se asume funciones de probabilidad de distribución, así

como no correlación entre ellas. El margen de seguridad se puede expresar como:

$$G = R - S = 0 \tag{3}$$

La distribución de la función límite (G) está determinado por esta zona de falla, en donde la media de la función G (m_G) es proporcional a la desviación estándar (s_G). La proporción de estos dos parámetros es el índice de confiabilidad (β), por consiguiente, esta asume una distribución normal que puede evaluarse como:

$$m_G = \beta \cdot s_G \tag{4}$$

$$\beta = \frac{m_G}{s_G} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} \tag{5}$$

donde:

m_R y m_S corresponde a las medias de la distribución de la resistencia y las solicitaciones s_R y s_S corresponden a las desviaciones estándar de la distribución de la resistencia y las solicitaciones.

Para los futuros ingenieros, es importante su formación académica e investigativa, en el tema de seguridad estructural y riesgo de las construcciones existentes y nuevas, con el objeto de evitar su colapso parcial o total. Este prototipo es una herramienta muy útil para explicar los fundamentos básicos de la confiabilidad. Por lo cual se decidió adaptarlo, con el propósito de hacer diferentes análisis de su capacidad estructural y probabilidad de falla, variando la intensidad y magnitud de las cargas dinámicas que se pueden generar en el modelo. Para esto, fue necesario estudiar las propiedades mecánicas del acero y determinar la curva de probabilidad del límite de fluencia del acero (Figura 8). Mediante simulación numérica de los datos experimentales, se complementó la curva de resistencia.

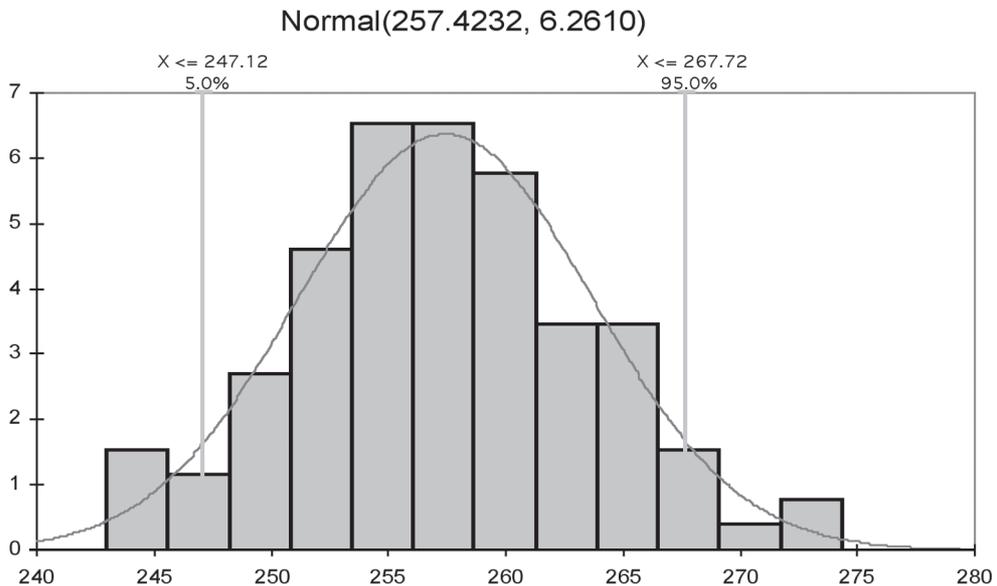


Figura 8. Curva de probabilidad del límite de fluencia del acero. Fuente: (Los autores).

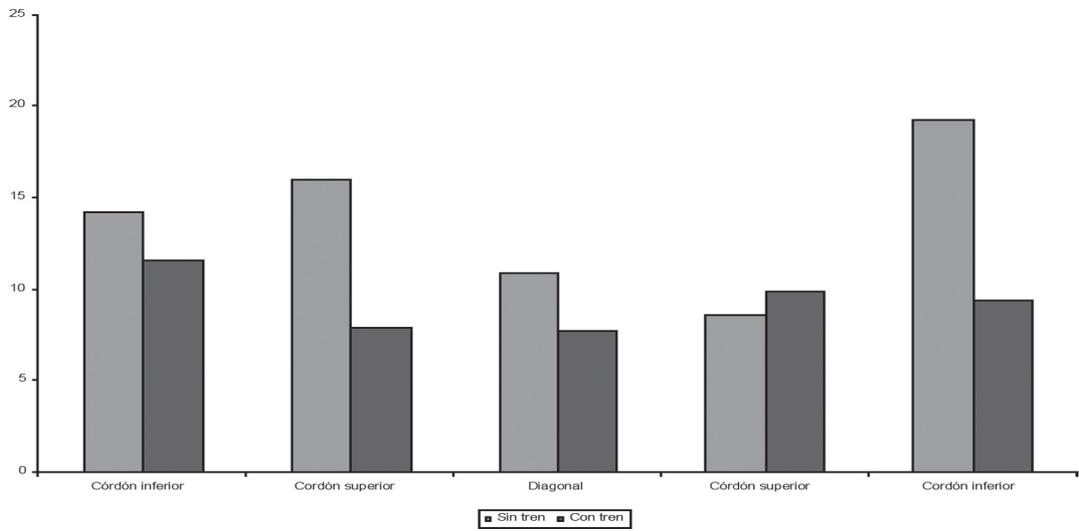


Figura 9. Índices de confiabilidad de los elementos monitoreados en el puente.
Fuente: (Los autores).

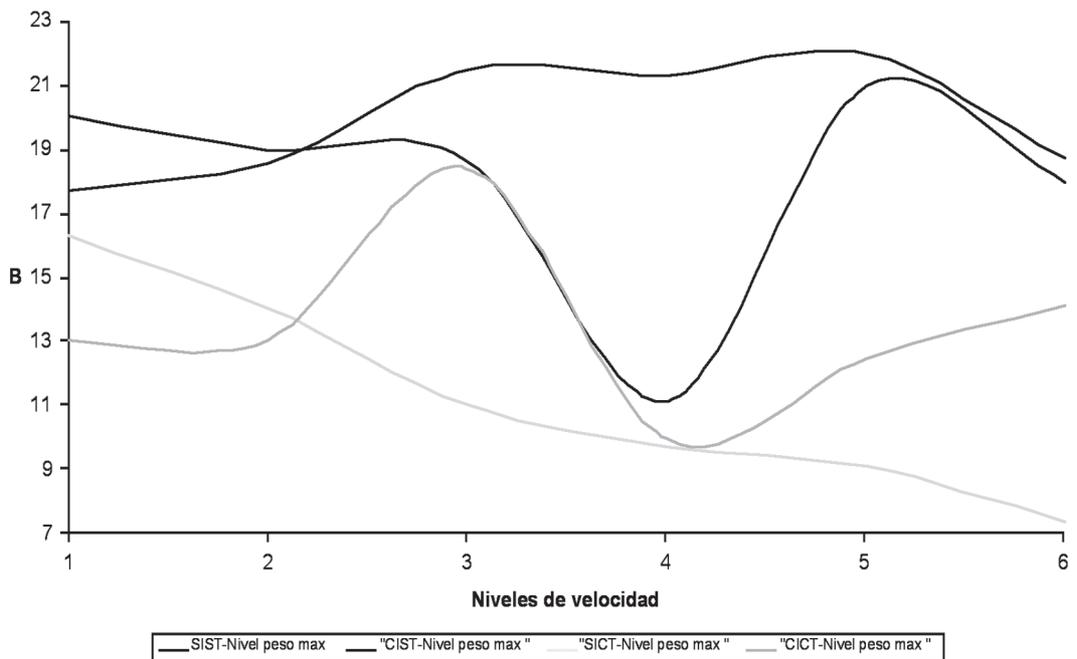


Figura 10. Análisis de confiabilidad en un solo elemento, con hipótesis de carga diferentes.
Fuente: (Los autores).

Dentro del programa de análisis, se diseñó un algoritmo, para determinar las curvas de probabilidad de las fuerzas internas, de cada uno de los elementos para cada hipótesis de carga (media y desviación estándar). Para exponer su aplicación, se determinaron los índices de confiabilidad de cada uno de los elementos, para las mismas hipótesis de carga expuestas en el ejercicio anterior. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 9.

Al comparar los índices de confiabilidad obtenidos de cada uno de los elementos instrumentados del prototipo, se concluye que su seguridad estructural es adecuada. Esta deducción se sustenta en que los índices de confiabilidad obtenidos en los elementos instrumentados mediante el proceso de instrumentación, cumplen con las recomendaciones del EUROCODE. (Documento No. 1 Vol. 3 “Traffic loads on bridges” ($3,5 \leq B \leq 4$)). En la Figura 10 se presenta otro ejemplo, donde se determinó, para un solo elemento, la variación de los índices de confiabilidad para diferentes hipótesis de carga y variando la velocidad.

3.3 Calibración de modelos

Para el diseño o revisión de una construcción, es indispensable implementar modelos estructurales compuestos por elementos finitos discretos y/o continuos. Para los futuros ingenieros, es fundamental tener los conceptos básicos de análisis simple y avanzado de estructuras en el rango elástico e inelástico. Estos conceptos se pueden entender mediante la elaboración de modelos estructurales y a través de su calibración, donde se tiene que verificar los resultados analíticos con respecto a los experimentales (Serrano & Jussef, 2005). Para motivarlos académicamente en esta labor, se realizó el modelo estructural del prototipo (programa SAP-2000), basados en el levantamiento detallado y riguroso de sus dimensiones, secciones, uniones, apoyos y demás aspectos. Para determinar las dimensiones de las secciones con exactitud,

se empleó un equipo de medidor de espesores remanentes mediante ultrasonido. Para la calibración se realizó una prueba de carga sobre el puente, empleando los carros y trenes, de los cuales se conoce sus dimensiones y la intensidad de sus cargas. Se establecieron tres hipótesis de carga, las cuales se presentan en la Figura 11. Para involucrar a los estudiantes en investigación, se les exponen las experiencias en proceso de calibración de modelos estructurales de puentes reales. En este caso se les mostró la prueba de carga (Figuras 12, 13 y 14) y los resultados de la calibración del puente Puerto Salgar (real).

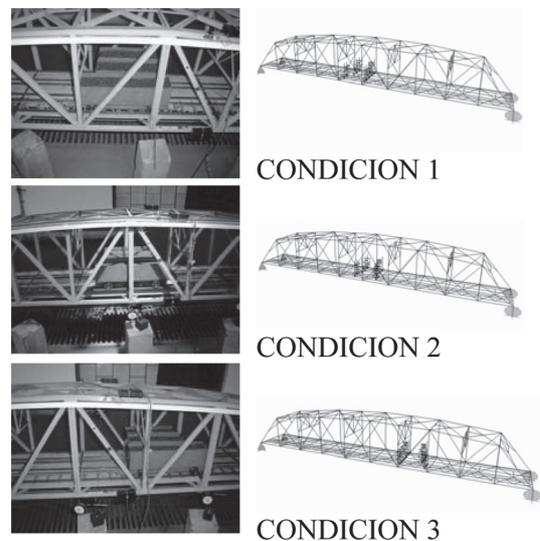


Figura 11. Hipótesis de carga para la prueba de carga.
Fuente: (Los autores).

Posteriormente, se determinaron los efectos de las cargas sobre el modelo a escala. El primero consistió en evaluar las fuerzas internas en los elementos monitoreados para cada hipótesis de carga. El segundo correspondió a la evaluación de la deformación vertical de la estructura en diferentes puntos, empleando deformímetros con una precisión de 1/100 mm. Se logró un rango de calibración del modelo estructural entre el 80% y el 85%, lo que representa una diferencia entre lo experimental y analítico, que varía entre el 15% y el 20%.



Figura 12. Primera condición de carga Puente real.
Fuente: (Los autores).



Figura 13. Segunda hipótesis de carga Puente real.
Fuente: (Los autores).



Figura 14. Tercera hipótesis de carga Puente real.
Fuente: (Los autores).

3.4 Diseño y construcción de estructuras metálicas

El modelo a escala corresponde a una estructura metálica construida hace más de cincuenta años. Mediante este modelo se remonta a los estudiantes en la historia de la ingeniería, para que evalúen las metodologías de análisis y procesos constructivos de uno de los puentes principales de Colombia, construido hace más de cincuenta años por ingenieros alemanes. Mediante este prototipo, se pueden explicar a los estudiantes conceptos básicos de la estructura metálicas tales como: cordón inferior, cordón superior, diagonal, elementos a tensión, elementos a compresión, secciones compactas, secciones esbeltas, pandeo global, pandeo local, uniones, remaches, soldadura, apoyos, conectores de cortante, etc. Además de explorar las técnicas modernas de diseño y construcción de puentes en acero y su comportamiento ante cargas móviles.

4. CONCLUSIONES

1. Este prototipo se constituye en un complemento didáctico y práctico de las clases magistrales de las asignaturas principales de la Ingeniería Estructural, con el cual se ha mejorado sustancialmente la formación académica de los estudiantes.
2. Mediante esta herramienta se ha logrado incrementar la asistencia, participación y motivación de los estudiantes en las clases

del área de estructuras. También para involucrar a los estudiantes, en algunos temas de investigación del área de estructuras, validos para su futuro proyecto de grado e importante para su futuro desempeño en la etapa profesional o de postgrado.

3. Este trabajo ha generado un insumo para el tema de investigación de los estudiantes de la carrera de ingeniería civil, pudiéndose profundizar en las áreas de análisis estructural, confiabilidad estructural y evaluación del riesgo de estructuras.
4. Es un ejemplo docente de trabajo interdisciplinario, donde han participado estudiantes de las carreras de Arquitectura, Ingeniería electrónica, Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Civil.

5. TRABAJOS FUTUROS

El Grupo de Estructuras continúa trabajando en la línea de investigación relacionada con confiabilidad estructural. Uno de sus propósitos es profundizar en la simulación de casos y/o eventos reales a través del prototipo desarrollado, empleando las leyes de similitud. En este sentido se elaboró otro prototipo, correspondiente a uno de los puentes importantes de Colombia. En las Figuras 15 y 16, se presentan fotografías del puente Cajamarca y de su modelo a escala, localizado en la carretera Ibagué-Armenia. El modelo a escala



Figura 15. Puente Cajamarca localizado en la carretera Ibagué-Armenia.
Fuente: (Los autores)

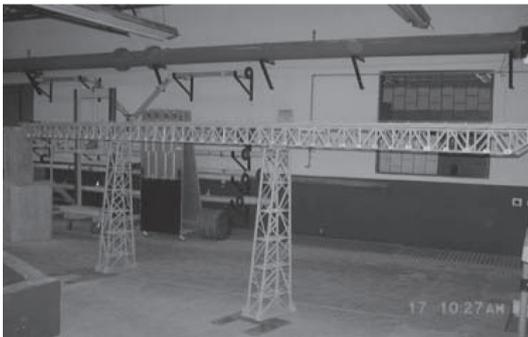


Figura 16. Modelo a escala del puente Cajamarca.
Fuente: (Los autores)

se elaboró dentro de un trabajo de grado de la Carrera de Ingeniería Civil (Serrano & Jussef, 2005) y es una herramienta que servirá para la planeación en el futuro de la instrumentación del puente real. Además, sirve como prototipo didáctico del Laboratorio de Estructuras, para la enseñanza activa de algunos conceptos básicos de la ingeniería Estructural. Se tiene

proyectado implementarle a este modelo el mismo sistema dinámico de carros que tiene el puente Salgar y una mesa vibratoria en cada una de las bases de las pilas de este modelo. Hacer prácticas didácticas en algunas de las asignaturas del área de estructuras, haciendo mediciones de deformaciones verticales, fuerzas internas de algunos de los elementos y la evaluación de su comportamiento dinámico, empleando deformímetros mecánicos, galgas extensométricas y un acelerómetro, respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Muñoz, E. E., Ruiz, D., Prieto J. A. & Ramos, A. (2006). Estimación de la vulnerabilidad sísmica de una edificación indispensable mediante confiabilidad estructural. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, Facultad de Ingeniería.

Muñoz, E. E., Núñez, F., Rodríguez, W., Otalora, C. & Ruiz, D. (2006). Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Ingeniería y Universidad.

Muñoz, E. E., Prieto, J. A. & Obregón, N. (2004). Evaluación de puentes existentes mediante confiabilidad parcial. Aplicación para un puente en concreto preesforzado. *Ingeniería de Construcción*, Chile, 3(18).

Muñoz, E. E., Daza, R. D., & Obregón, N. (2002). Metodología de evaluación estructural de puentes metálicos por técnicas de fiabilidad estructural. *Ingeniería de Construcción*, Chile, 1(17).

Muñoz, E. E. (2001). *Estudio de las causas del colapso de algunos puentes de Colombia*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Ingeniería y Universidad.

Rodríguez, W., Muñoz, E. & Núñez, F. (2007). Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes. *Ingeniería*, 1(17).

Ruiz, D., Uribe, E. J. & Phillips, C. (2005). Modelos estructurales: Gran incentivo para aprender el comportamiento estructural. ACOFI, XXV Reunión de Facultades de Ingeniería. Cartagena.

Serrano, M. & Jussef, M. (2005). *Calibración del prototipo didáctico del modelo a escala*

del puente de Cajamarca. Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

SOBRE LOS AUTORES

Edgar Eduardo Muñoz Díaz

Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Jefe de la Sección de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil
Grupo *Estructuras*
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia
Teléfono: 3208320 Ext. 5262
Correo electrónico: edgar.muñoz@javeriana.edu.co

Federico Alejandro Núñez Moreno

Ingeniero Civil
Joven investigador
Grupo *Estructuras*
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia
Teléfono: 3208320 Ext. 5225
Correo electrónico: fnunez@javeriana.edu.co

Camilo Otalora Sanchez

Ingeniero Electrónico
Profesor investigador del Departamento de Ingeniería Electrónica
Grupo *Estructuras*
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia
Teléfono: 3208320 Ext. 5334
Correo electrónico: Camilo.Otalora@javeriana.edu.co

